

岸壁の地震時の変形と被害の相関に関する統計的分析

A STATISTICAL ANALYSIS ON CORRELATION BETWEEN DEFORMATION OF QUAY-WALL DURING EARTHQUAKE AND ITS DAMAGE

長尾 毅¹・尾崎竜三²
Takashi NAGAO and Ryuzo OZAKI

¹正会員 工博 国土技術政策総合研究所 港湾施設研究室 (〒239-0826 横須賀市長瀬3-1-1)

²正会員 博(工) 中央復建コンサルタンツ(株) (〒533-0033 大阪市東淀川区東中島4-11-10)

Technical standards for port and harbor facilities were revised in 2007 and the deformation of quay-wall during earthquake became the controlled object in seismic safety verification. As an introduction to the establishment of the method for the determination of the allowable deformation for gravity type and sheet pile type quay-wall, this paper shows the statistical analysis on correlation between deformation of quay-wall during earthquake and its damage.

Firstly, we gathered the damage data from the report of past several earthquakes and closely examined the collected data set. Secondly, we surveyed the correlation among the parameters focusing on the failure loss cost and recovery days. Finally, we conducted the multiple regression analyses and proposed the regression equations for the failure loss cost and recovery days according to the deformation of the quay-walls and other design conditions.

Key Words : *Quay-wall, deformation, earthquake, statistical analysis, recovery days, failure loss cost*

1. はじめに

港湾の施設の技術上の基準(以下、港湾基準)¹⁾が2007年に改正され、岸壁の耐震性能照査において変形量が制御対象となった。ここで、レベル1地震動に対する重力式岸壁や矢板式岸壁の変形量許容値の標準値はそれぞれ10cm, 15cmであり、これは過去の耐震性能照査法による平均的な水準として定められている。10-15cmという変形量は、実際の被災時の変形量としてみた場合に、直ちに修復を要するような値ではない。即ち、新しい港湾基準で定められている変形量許容値は、実際の限界値という意味ではなく、各種の不確定要因を考慮して、安全側に設定された値であると言える。

ところで、新港湾基準では性能設計の体系が導入されているため、変形量許容値は、状況に応じて変更することが許容されている。ただし、設計実務においてこの許容値を変更するためには、ライフサイクルコストなどの観点から、設定した変形量許容値が妥当であることを示す必要がある。このためには、対象港湾における岸壁の変形量に応じた被災時の損失を適切に見積もる必要があるが、設計実務でそのようなデータを個別具体的な港湾に応じて構築することは困難である。このような背景のもと、本研究で

は、岸壁の変形量許容値の設定方法を構築する端緒として、過去の地震被災資料²⁾⁻⁷⁾および港湾管理者へのヒアリングなどをもとに、岸壁の変形量と被害の相関に関する統計的分析を行った。

2. 被災事例調査

1983年日本海中部地震、1993年釧路沖地震、2003年十勝沖地震などの過去の8つの被害地震を対象に統計分析を行うための被災事例調査を行った。調査対象は、港湾施設被害報告(港湾技術研究所、または港湾空港技術研究所)などのまとめられている8例である(表-1参照)。1995年兵庫県南部地震については、レベル1地震動による変形量と言った観点からここでは対象外としている。ところで、港湾において被害状況が報告書にまとめられていないものもある。とくに2003年十勝沖地震、2005年福岡県西方沖地震については、ヒアリングに基づき収集されたデータによるとともに、2005年福岡県西方沖地震については、(独)港湾空港技術研究所より提供いただいたデータを元としている。調査項目の一覧を表-2にまとめる。また事例調査の際の注意点として以下について考慮した。

表-1 調査対象地震

地震名	発震年月日	震源			マグニチュード	被害概要
		北緯(度)	東経(度)	深さ(km)		
1983年 日本海中部地震	1983/5/26	40.35	139.08	14	7.7	東北地方の日本海沿岸の港湾施設・海岸保全施設に被害が発生した。特に秋田港では大型岸壁の80%に被害が発生した。
1993年 釧路沖地震	1993/1/15	42.85	144.38	107	7.8	北海道東部太平洋沿岸の釧路港、霧多布港、十勝港、根室港、浦河港の港湾、厚岸漁港等の漁港、釧路空港で被害が発生した。
1993年 北海道南西沖地震	1993/7/12	42.78	139.18	35	7.8	港湾施設では奥尻島の奥尻港、北海道南西部の岩内港、瀬棚港、江差港、松前港、函館港、森港、苫小牧港の8港で被害が発生した。
1994年 北海道東方沖地震	1994/10/4	43.37	147.71	23	8.1	北海道東部沿岸の根室港、霧多布港、釧路港の港湾、厚岸漁港の漁港で被害が発生した。
2000年 鳥取県西部地震	2000/10/6	35.28	133.35	11	6.6	鳥取県西部沿岸の境港、境漁港、安来港、松江港、米子港、美保飛行場で被害が発生した。
2001年 芸予地震	2001/3/24	34.10	132.70	51	6.4	港湾施設では、広島港、呉港、松山港、今治港等において被害が発生した。
2003年 十勝沖地震	2003/9/26	41.78	144.08	42	8.0	釧路港などでは液状化現象が多数発生した。港湾施設に関する被害は、釧路港、十勝港などにおいて発生した。
2005年 福岡県西方沖地震	2005/3/20	33.74	130.18	9	7.0	港湾施設では、博多港に集中しており、岸壁本体の変形やエプロンの沈下などが発生した。

表-2 調査項目

調査項目	概要
港	調査対象施設の存在する港湾名である。
地区名	調査対象施設の存在する地区名である。
施設名	調査の対象とした施設の名称である。
構造形式(大項目)	重力式、矢板式などの構造形式である。
構造形式	ケーソン式、控え杭式矢板などの構造形式である。
延長	対象岸壁の延長である。
水深	対象岸壁の水深である。
天端高	対象岸壁の天端高である。
設計震度	対象岸壁の設計震度である。
被災程度	被害調査報告書に示される被災程度である。
被災延長	被害調査報告書に示される被災延長である。
被災額	被害調査報告書に示される被災額である。
1mあたりの被災額	被災延長1mあたりの被災額である。
現在価値換算(2006年時*)	被災当時の1mあたりの被災額を年率4%で考慮して、価値換算したものである。
天端沈下量	岸壁天端沈下量である。(最大値, 最小値, 差)
エプロン最大沈下量	岸壁背後のエプロンの最大沈下量である。
法線からの距離	エプロン最大沈下量が得られている地点の法線からの距離である。
法線出入量	調査時に設定された基準法線からの被災後の法線の出入量である。(最大値, 最小値, 差)
復旧日数	岸壁の復旧に要した日数である。

*被害データ調査時の2006年としている。

○岸壁変形量(法線出入量, 天端沈下量)

変形量の指標として法線出入量と天端沈下量を考慮する。法線出入量については、調査時に設定された基準法線が被災岸壁毎にばらついていると考えられるため、最大値のみならず、最大値と最小値の差分を法線出入量差として分析に用いた。

○被災額

地震被災資料に示される被災額として、1岸壁のみで得られているものと同一構造形式の複数岸壁に対して得られているものを対象とした。被災総延長で除すことで1mあたりの被災額として扱い、地震当時の被災額を社会的割引率4%により現在(2006年とする)価値換算した被災額を分析対象とした。

○復旧日数

同じ地震による被災岸壁で、復旧完了日が同じ日となっている事例については、工事発注がまとめて行われ、全ての工事の完了を持って復旧と見なされた可能性があるためまとめて扱った。

調査で得られたデータは全部で321セットである。しかし、表-2に示す全ての項目が得られているわけではない。重力式、矢板式岸壁については分析が行えるだけのデータを収集できたが、栈橋を含むその他の形式については、データ数が少なかったため、

重力式、矢板式岸壁を以後の検討対象とした。

3. 相関分析

2. で整理したデータに基づき回帰分析を行って、項目間の相関について検討する。

現在価値換算した1mあたりの被災額および復旧日数を目的変数として扱った。説明変数には岸壁変形量、壁高、設計震度などを採用した。

(1)被災額(図-1参照)

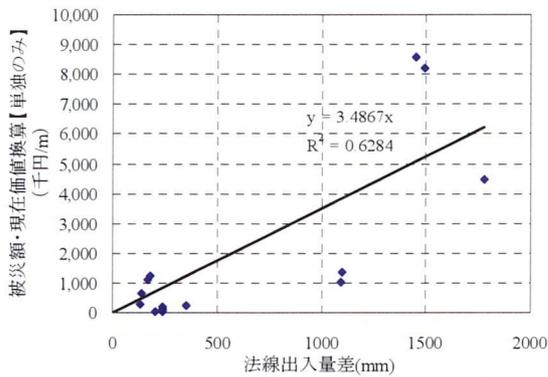
項目間の相関について検討した結果、重力式岸壁については、被災額と法線出入量差は比較的相関が高い。矢板式岸壁については、被災額と天端沈下量最大値の相関が比較的高いことが分かった。一方で、壁高、設計震度については、重力式、矢板式岸壁ともに被災額との相関は高くないことが分かった。これは岸壁の変形量、壁高、設計震度などの複数の要因が被災額に影響しており、単一の要因では被災額を表現できないことが原因と考えられる。なお、単独の岸壁のみのデータ数が少なかった矢板式岸壁については、単独岸壁のデータに複数岸壁について得られた被災額のデータを加えて検討した。

(2)復旧日数(図-2参照)

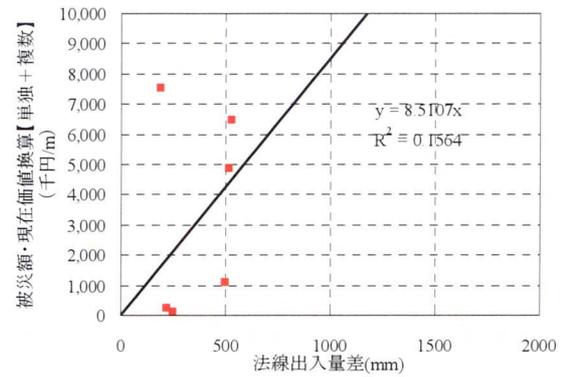
復旧日数については、変形量が小さくても復旧日数が長く、復旧に着手してからの工事の優先度が低かったと推測される例があることなどの理由で変形量と復旧日数の相関はあまり高くない。壁高、設計震度についても、復旧日数との相関はあまり高くないことが分かった。別途、被災延長、被災額との関係についても検討したが、相関が高くなかった。

4. 重回帰分析

岸壁の構造形式により、地震時の変形や被災のメカニズムは異なる。また岸壁の規模等に応じて復旧の優先度や工事費、材料費なども変わる。岸壁の変形量が大きければ、被災額が大きくなり、さらに復

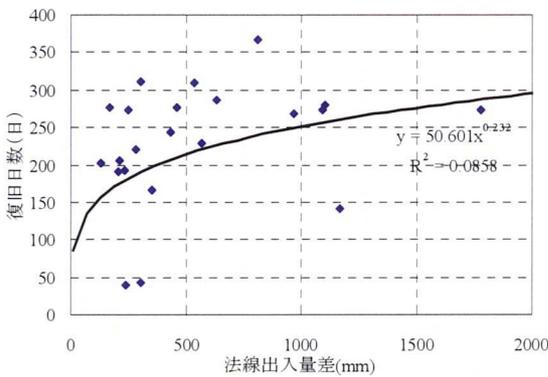


(1) 重力式：法線出入量差との関係

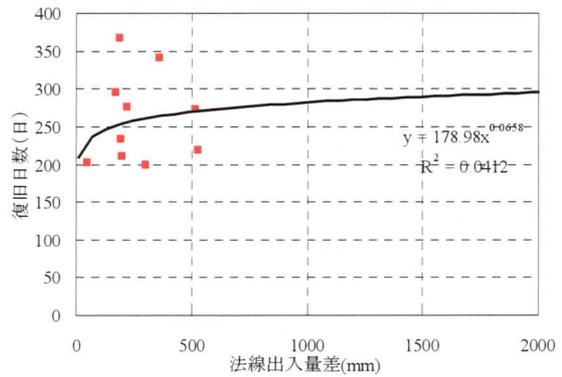


(2) 矢板式：法線出入量差との関係

図-1 被災額との関係



(1) 重力式：法線出入量差との関係



(2) 矢板式：法線出入量差との関係

図-2 復旧日数との関係

表-3 被災額の回帰分析結果

構造形式	ケース	説明変数			係数				決定係数	データ数
		X_1	X_2	X_3	A_0	A_1	A_2	A_3		
重力式	1	設計震度	壁高	天端沈下量最大	0.077	-1.094	-0.865	1.641	0.843	11
	2	設計震度	壁高	法線出入量差	0.00016	-2.800	0.556	1.436	0.738	14
	3	設計震度	—	法線出入量差	0.0007	-2.701	—	1.431	0.727	14
	4	—	壁高	法線出入量差	22.79	—	-1.000	0.960	0.405	14
矢板式	1	設計震度	壁高	天端沈下量最大	548.48	-0.637	-2.576	1.071	0.231	9
	2	設計震度	壁高	法線出入量差	0.12	-0.778	0.014	1.399	0.330	7
	3	設計震度	—	法線出入量差	0.12	-0.778	—	1.400	0.330	7
	4	—	壁高	法線出入量差	0.13	—	0.675	1.368	0.280	8

※係数 A_0, A_1, A_2, A_3 は、式(1)の通りである。

旧日数が長くなると考えられる。この関係を重回帰分析により表現することを試みる。

3. の検討より、単一の指標のみで被災額、復旧日数を表現するより、複数の指標をあわせて考慮すべきであると言える。

ここで、構造形式については質的データであるため、形式毎にモデルを分ける。その上で、岸壁の法線出入量、天端沈下量、設計震度、壁高などを量的説明変数として選択し、岸壁 1m あたりの現在価値換算した被災額、復旧日数を目的変数として重回帰分析を実施する。

(1) 被災額の推定式

パラメタとして、設計震度、壁高、変形量などを考慮し、被災額の推定式を検討する。その際、表-3

に示す説明変数を採用した。なお、変形量に関する指標として、天端沈下量最大と法線出入量差の両方を説明変数とすることも考えられるが、調査の結果両者には相関関係があり、多重共線性の問題があるため回帰ケースとしては考慮しないこととした。

モデルとしては、変形量が 0 になれば、被災額も 0 となるように式(1)に示す非線形の重回帰モデルを採用する(式は 3 変数の場合)。

$$Y = A_0 X_1^{A_1} X_2^{A_2} X_3^{A_3} \quad (1)$$

ここに、

Y : 目的変数

X_i : 説明変数(この場合、 $i=1\sim3$)

A_i : 回帰係数(この場合、 $i=0\sim3$)

3. (1)と同様に、データ数の多い重力式岸壁については、単独被災額のデータを用いることとし、単独被災額のみデータでは回帰式の作成が困難な矢板式岸壁については、単独+複数の被災額のデータを用いることとする。

推定した回帰式の回帰係数について決定係数とともに表-3にまとめる。重力式岸壁の被災額の推定式については、決定係数の高いモデルも見られる。一方、矢板式岸壁の被災額推定式については決定係数が低くなっている。複数被災額のデータを考慮しているため、データのばらつきが大きくなったことによると考えられる。

(2) 被災額の推定式についての考察

a) 重力式岸壁

岸壁の変形量許容値の設定に関連して回帰式の適用性を考えると、指標として設計震度、壁高、法線出入量最大を採用した回帰式が望ましい。

ここで、法線出入量最大値と出入量差の関係を考慮すると、図-3に示すように、ある程度良い相関があることが分かった。そのため、ケース2の回帰式とこの関係式を用いることで法線出入量最大値を指標とした回帰式の作成は可能である。

ケース2の回帰式の予測値と実測値の関係を図-4に示す。実測被災額 8000 千円/m を超える2つのデータについては、5000 千円/m を下回る結果となった。この回帰式は大きい被災額を低く見積もる可能性があると考えられる。そこで、データを精査し、再度回帰式を検討した。

結果として、得られる推定式の係数は表-4、式(2)に示すとおりであり、また実測被災額と予測被災額の間を関係図-5に示す。

図-5より実測被災額 8000 千円/m を超える2つのデータの予測値が図-4よりも上がっており、今回のデータによる推定結果を見ると、変形量が大きく

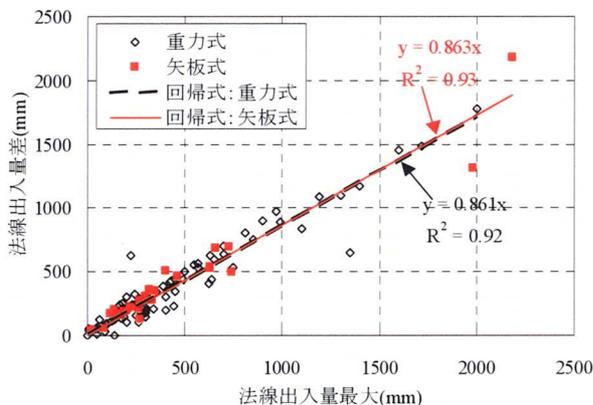


図-3 法線出入量の関係

表-4 重力式：データ精査後の回帰分析結果

説明変数			係数				決定係数	データ数
X_1	X_2	X_3	A_0	A_1	A_2	A_3		
設計震度	壁高	法線出入量差	1.209E-06	-2.141	2.493	1.682	0.813	11

なれば、被災額が大きくなる傾向のある推定式が得られていることが分かる。

$$Y = 1.209 \times 10^{-6} \cdot k_h^{-2.141} \cdot H^{2.493} \cdot Dx^{1.682} \quad (2)$$

$$= 0.938 \times 10^{-6} \cdot k_h^{-2.141} \cdot H^{2.493} \cdot Dx_{\max}^{1.682} \quad (3)$$

ここに、

Y：被災額(千円/m)

k_h ：設計震度

H：壁高(m)

Dx：法線出入量差(mm)

Dx_{\max} ：法線出入量最大(mm)

b) 矢板式岸壁

矢板式岸壁では、複数被災額のデータも含めて検討している。複数被災額のデータを選定に際しては、変形量が最大となるデータにより代表させたが、変形量に関する係数が小さいため、被災額の予測値として危険側の値を算出する可能性があると言える。そこで、複数被災額のデータを変形量の平均値に対応させて推定式の作成を試みた。説明変数としては重力式岸壁と同様にケース2を選定する。

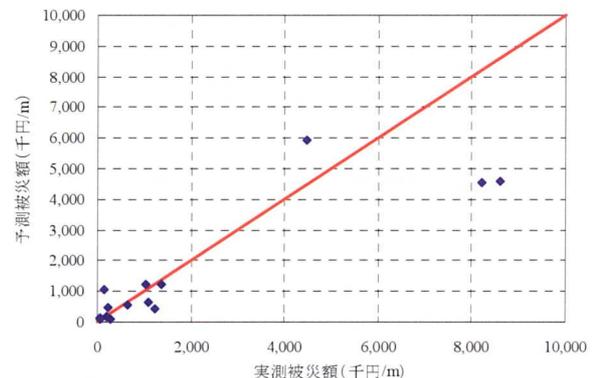


図-4 重力式：ケース2の実測値予測値の比較

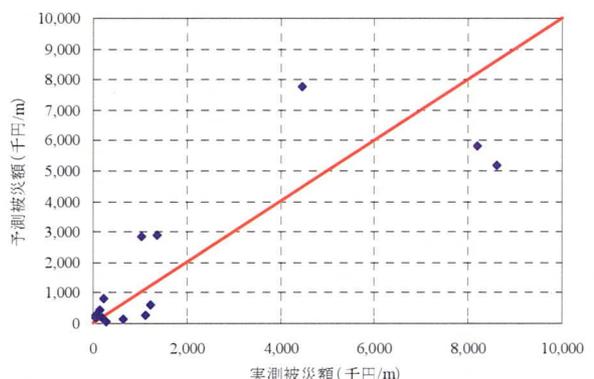


図-5 重力式：データ精査後の実測値予測値の比較

表-5 矢板式：データ精査後の回帰分析結果

説明変数			係数				決定係数	データ数
X_1	X_2	X_3	A_0	A_1	A_2	A_3		
設計震度	壁高	法線出入量差	2.919E-04	-1.262	0.962	1.896	0.364	7

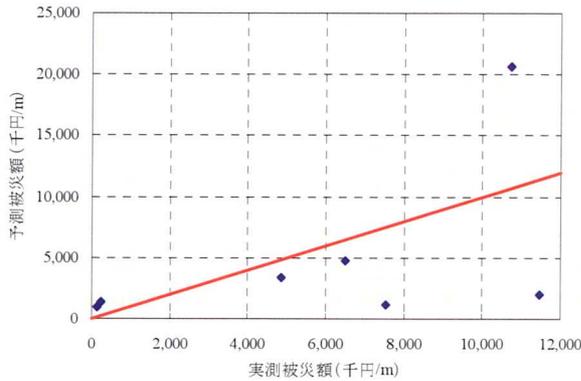


図-6 矢板式：ケース2の実測値予測値の比較

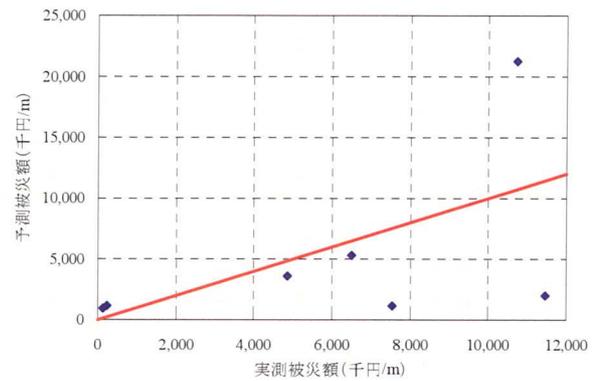


図-7 矢板式：データ精査後の実測値予測値の比較

表-6 復旧日数の回帰分析結果

構造形式	ケース	説明変数			係数				決定係数	データ数
		X_1	X_2	X_3	A_0	A_1	A_2	A_3		
重力式	1	被災延長	被災額	—	4.93	0.495	0.145	—	0.393	42
	2	被災延長	被災額	法線出入量差	20.10	0.184	0.259	-0.067	0.361	8
	3	被災延長	被災額	天端沈下量最大	23.55	0.071	0.027	0.272	0.602	18
矢板式	1	被災延長	被災額	—	14.10	0.363	0.108	—	0.320	17
	2	被災延長	被災額	法線出入量差	0.0221	1.277	0.348	-0.051	0.547	7
	3	被災延長	被災額	天端沈下量最大	779.14	-0.553	0.091	0.168	0.281	12

※係数 A_0, A_1, A_2, A_3 は、式(1)の通りである。

設計震度、壁高、法線出入量差を説明変数とした推定式は表-5および式(4)に示すとおりである。また実測及び予測被災額の関係を図-6, 7に示す。

データ精査後も回帰式の決定係数はあまり良くはないが、これはデータ数が少なく、得られているデータにもばらつきがあることによると考えられる。

本検討におけるデータを用いた場合、図-6と図-7の比較からは推定結果にほとんど差が見られないが、表-5と表-3の比較から、新たに設定した回帰式において変形量が大きくなれば被災額が大きくなる推定式となっていることが分かる。

$$Y = 2.919 \times 10^{-4} \cdot k_h^{-1.262} \cdot H^{0.962} \cdot Dx^{1.896} \quad (4)$$

$$= 2.193 \times 10^{-4} \cdot k_h^{-1.262} \cdot H^{0.962} \cdot Dx_{\max}^{1.896} \quad (5)$$

(3) 復旧日数の推定式

パラメタとして、被災延長、単位長あたりの被災額(現在価値換算額)、変形量などを考慮し、復旧日数を推定する回帰式を検討する。その際、表-6に示す説明変数を採用した。

回帰モデルには、非線形の重回帰モデルを採用する。重力式、矢板式についての回帰分析結果を表-6に示す。変形量も説明変数として扱った場合に、決定係数が大きくなる場合があることが分かる。

しかしながら、被害額の回帰式では法線出入量を説明変数の1つとして採用している。このため復旧日数の説明変数に変形量を含めることは適切ではないと考えられることから、説明変数として被災延長、被災額のみを用いた回帰ケース1が適切であると考えられる。

(4) 復旧日数の推定式についての考察

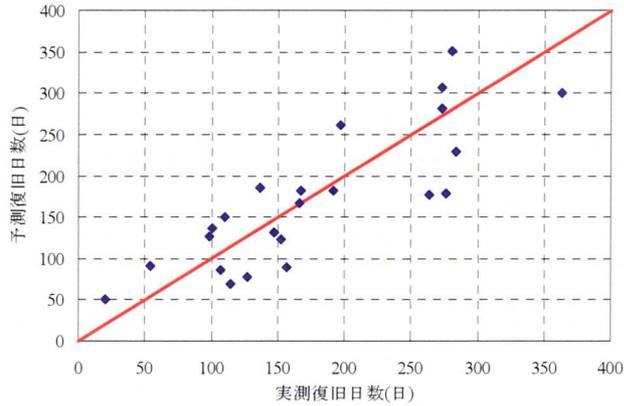
被災延長が長く、被災額が大きくなれば、復旧日数を要する回帰式となるよう改善することを目的として、データを精査・選定して、復旧日数の推定式の作成を試みた。

最終的に推定式の適用範囲を考慮して、被災額の小さい150千円/m以下、被災額の大きい10000千円/m以上のデータを除外して回帰式を作成した。結果として得られた回帰式を表-7、式(6)、(7)に示す。また実測復旧日数と予測復旧日数の関係を図-8に示す。

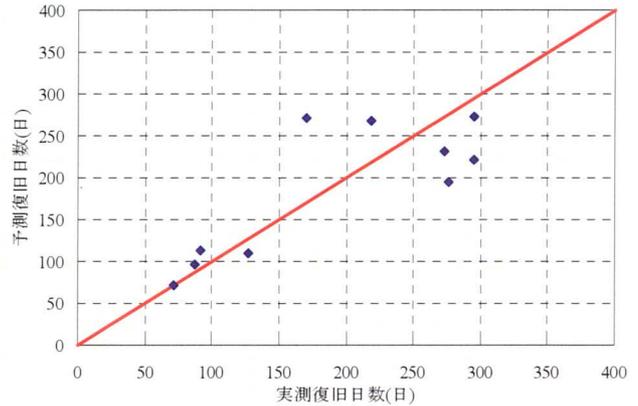
重力式、矢板式ともに図-8に示すように、実測値と予測値の関係はほぼ $Y=X$ の式の回りに分布することが分かる。表-6に示す被災延長、被災額を説明変数とした回帰式に比べると、係数 A_0 が小さいため、被災延長、被災額が小さくなると、予測値は実測値よりも小さい値を与える傾向が大きい反面、被災延長、被災額が大きくなれば、復旧日数の予測値は大きくなる回帰式となっている。

表-7 回帰分析結果（データ精査後）

構造形式	説明変数		係数			決定係数	データ数
	X_1	X_2	A_0	A_1	A_2		
重力式	被災延長	被災額	1.544	0.506	0.326	0.666	23
矢板式	被災延長	被災額	5.706	0.503	0.139	0.794	10



(1) 重力式



(2) 矢板式

図-8 実測値と予測値の比較

$$\text{重力式: } Y = 1.544 \cdot L^{0.506} \cdot C^{0.326} \quad (6)$$

$$\text{矢板式: } Y = 5.706 \cdot L^{0.503} \cdot C^{0.139} \quad (7)$$

ここに、

Y : 復旧日数

L : 被災延長 (m)

C : 被災額(千円/m)

5. まとめ

本研究では、過去の地震による被災岸壁の事例を収集し、収集した事例に関して各項目間の相関関係の整理を行い、最終的に被災額、復旧日数の推定式を作成した。得られた結論をまとめると以下の通りである。

- 1) 被害額、復旧日数については、被災時の変形量や岸壁の諸元など単一の要因では表現できず、複数の要因をあわせて考慮すべきである。
- 2) 上記の観点から、被災額及び復旧日数を目的変数とした重回帰分析を実施し、回帰式を求めた。決定係数は低いものの収集・精査したデータを用いて得られる推定式としては、比較的妥当な推定式を得たと考えられる。

謝辞: 本研究の遂行にあたり、(独)港湾空港技術研究所 野津 厚 主任研究官より貴重なデータを提供いただきました。ここに記して感謝いたします。

参考文献

- 1) 国土交通省港湾局監修，日本港湾協会：港湾の施設の技術上の基準・同解説，2007. 7.
- 2) 土田肇，野田節男，稲富隆昌，上部達生，井合進，大根田秀明，外山進一：1983 年日本海中部地震港湾被害報告，港湾技術研究所資料，No. 511，1985. 3.
- 3) 上田茂，稲富隆昌，上部達生，井合進，風間基樹，松永康男，藤本健幸，菊地喜昭，宮井真一郎，関口信一郎，藤本義則：1993 年釧路沖地震港湾施設被害報告，港湾技術研究所資料，No. 766，1993. 12.
- 4) 稲富隆昌，上部達生，井合進，風間基樹，山崎浩之，松永康男，関口信一郎，水野雄三，藤本義則：1993 年北海道南西沖地震による港湾施設被害報告，港湾技術研究所資料，No. 791，1994. 12.
- 5) 稲富隆昌，上部達生，井合進，田中祐人，山崎浩之，宮井真一郎，野津厚，宮田正史，藤本義則：1994 年北海道東方沖地震による港湾施設被害報告，港湾技術研究所資料，No. 856，1997. 3.
- 6) 井合進，菅野高弘，山崎浩之，長尾毅，野津厚，一井康二，森川嘉之，小濱英司，西森男雄，佐藤陽子，田中剛，海老原健介，大村武史，大槇正紀：平成 12 年(2000 年)鳥取県西部地震による港湾施設等の被害報告，港湾空港技術研究所資料，No. 1015，2001. 12.
- 7) (独)港湾空港技術研究所：2001 年芸予地震による港湾施設等被害，<http://www.pari.go.jp/information/news/h13d/jisin/geiyo/toppage.htm>